

## II CONGRESO DE ACHE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

**Gestión de estructuras**

**Mantenimiento**



*(Fotografía: Paco Gómez)*

**Ampliar sin reforzar. El puente arco sobre el río Segura en Elche de la Sierra**

**Peter Tanner**

**Juan Luis Bellod**

## **Ampliar sin reforzar. El puente arco sobre el río Segura en Elche de la Sierra**

**Peter TANNER**

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, IETcc – CSIC y CESMA  
Ingenieros

**Juan Luis BELLOD**

CESMA Ingenieros

### **1. INTRODUCCIÓN**

La diferencia fundamental entre la evaluación de estructuras existentes y el proyecto de estructuras de nueva construcción reside en el estado de información. En el caso de una nueva construcción, los parámetros de los modelos de las cargas y de la resistencia de la estructura deben basarse en valores esperados, y se deben anticipar las imprecisiones relacionadas con la ejecución. Cuando la estructura analizada existe ya, son muchas las incertidumbres que se pueden reducir porque es posible afinar los modelos de cálculo para cada caso, aprovechando los resultados de inspecciones, ensayos y mediciones *in situ*. En estructuras existentes siempre es posible incrementar el nivel de precisión de los modelos de cálculo a través de la adquisición de más datos sobre la estructura analizada o, en otras palabras, actualizando la información disponible. En la mayoría de los casos, el coste de la actualización de la información se compensa con una reducción significativa del coste de la intervención o de otros costes, puesto que una evaluación demasiado conservadora puede conducir a limitaciones no justificadas de las cargas variables de uso, así como refuerzos o demoliciones innecesarias de estructuras existentes.

En la contribución se presenta un caso real de un puente arco cuyo tablero se debía ampliar. El reto consistía en la justificación de la fiabilidad de la estructura existente para las nuevas condiciones de utilización sin necesidad de reforzarla. A estos efectos se suele emplear un procedimiento por fases en el que, partiendo de datos generales, se afinan los modelos de resistencia y de las acciones de una fase a otra, actualizando y mejorando la información disponible.

## 2. EL PUENTE

El puente sobre el río Segura (figura 1) en Elche de la Sierra (Albacete) tiene 40 m de luz y fue construido en el año 1927 siguiendo las ideas y directrices del famoso ingeniero Eugenio Ribera (1864 - 1936) que se plasmaron en una colección oficial de puentes arco. La luz de 40 m se salva con un doble arco de 1.0 m de ancho, canto variable, directriz en parábola de 2º grado y con una relación flecha/luz de 1/10. La separación entre los dos arcos es de 3.1 m. Los montantes están formados por tabiques verticales, del mismo ancho que el arco, 0.25 m de espesor y con una separación de 2.0 m entre ejes de los montantes. El tablero es de hormigón armado con una losa maciza binervada, unida monolíticamente con los arcos en el centro del vano. Los estribos están formados por unos muros que resisten los empujes transmitidos por los arcos.



*Figura 1* Puente sobre el río Segura en Elche de la Sierra antes de la intervención

La armadura de los arcos está formada por perfiles laminados que, durante la construcción, constituían una cimbra autoportante. Esta técnica, desarrollada por Ribera, presentaba una doble ventaja. Por un lado permitía eliminar las complejas cimbras tradicionales y, por otro lado, contribuía a atenuar los riesgos inherentes a las crecidas de los ríos. Este tipo de construcción se puede considerar también como precursora de la construcción mixta.

De acuerdo con la colección oficial para los puentes de carreteras de tercer orden, el puente original tenía un ancho total de la plataforma de 6.0 m, con un ancho de calzada de 4.50 m y dos aceras de 0.75 m. Las dos aceras habían sido eliminadas en fechas desconocidas, de

manera que antes de la intervención la calzada ocupaba el ancho total de la plataforma. En el marco de la mejora de la carretera de Elche a Férrez llevada a cabo en el año 2001, fue necesario ampliar el ancho del tablero de 6.0 m a 9.0 m.

### **3. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN**

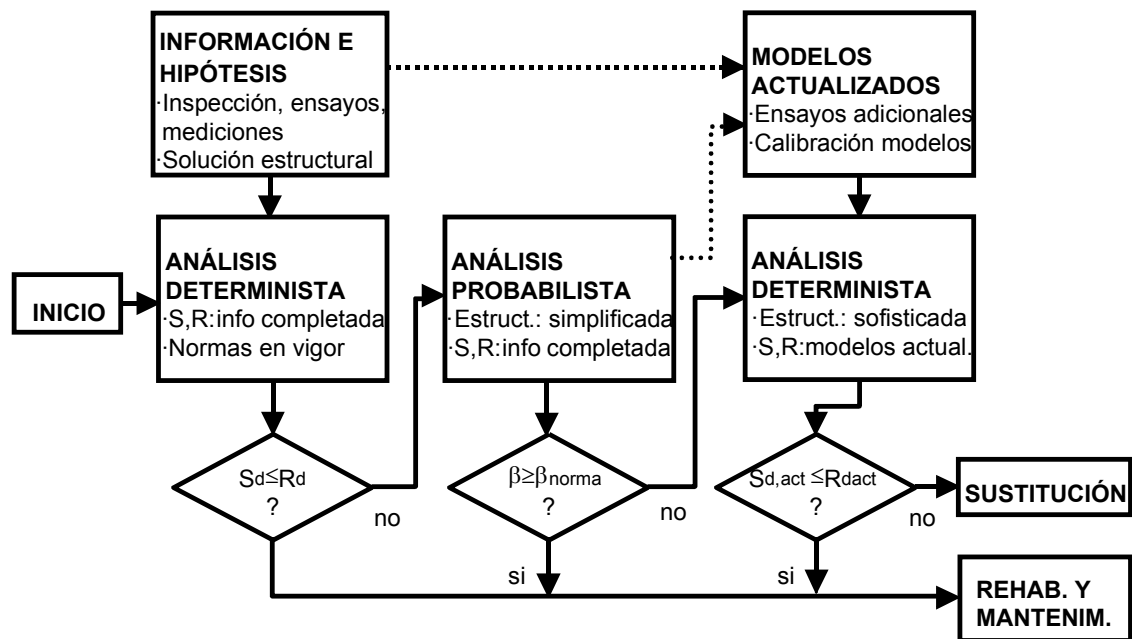
La figura 2 muestra el concepto del procedimiento de evaluación por fases mencionado en el apartado 1, así como su relación con la actualización de información.

Antes de proceder a la primera fase de la evaluación se debe recopilar toda la información disponible sobre la estructura. La validez de esta información se debe confirmar mediante una inspección visual. Dependiendo de la información disponible, también puede resultar necesario completar los datos previos mediante mediciones o incluso ensayos para poder efectuar una evaluación. En el presente caso, la realización de la evaluación exige también la adopción de una hipótesis sobre una posible solución estructural puesto que la rehabilitación está ligada al ensanche del tablero, lo que implica una modificación de la estructura, debiendo comprobar su seguridad estructural en las condiciones futuras de uso.

En la primera fase se lleva a cabo una evaluación semiprobabilista, utilizando los criterios de verificación de la seguridad estructural según un conjunto consistente de normas de dimensionamiento de puentes de carretera que estén en vigor, por ejemplo [IAP 1998] y [EHE 1998]. A estos efectos, los modelos de cálculo se basan en la información completada sobre la estructura, así como en las hipótesis adoptadas para la ampliación del tablero. En caso de que la seguridad quede verificada para todos los elementos estructurales existentes según los criterios mencionados, no es necesario proceder a la siguiente fase de la evaluación.

En caso contrario, se puede establecer un modelo estructural simplificado para el elemento más crítico, identificado en la primera fase. Este modelo debe permitir un análisis de la fiabilidad de la estructura utilizando modelos probabilistas para las acciones y la resistencia de la estructura (segunda fase). En la obtención de estos modelos se tiene nuevamente en cuenta la información completada sobre la estructura real. Si no se cumple el criterio para la verificación de la seguridad estructural de este elemento, es posible proceder a la siguiente fase de la evaluación, basada en un incremento de la precisión de los modelos de cálculo.

La mejora de los modelos es posible a través de la recopilación de más información específica sobre la estructura y las acciones. El análisis probabilista de la segunda fase de la evaluación aporta datos muy útiles para la planificación de las inspecciones, mediciones y ensayos adicionales: de los resultados es posible deducir para cuales de los diferentes parámetros una actualización sería más eficaz [Tanner 1997]. La información así mejorada se puede emplear para calibrar modelos deterministas actualizados para las acciones y la resistencia.



**Figura 2** Evaluación por fases y su relación con la actualización de información

En la tercera fase de la evaluación se lleva a cabo una verificación semiprobabilista de la fiabilidad de la estructura con los modelos actualizados de las acciones y de la resistencia. A estos efectos se puede utilizar, además, un modelo estructural más refinado que el empleado en las fases anteriores, incrementando aún más la precisión de la evaluación.

Si no se puede verificar la fiabilidad de la estructura mediante un análisis semiprobabilista con modelos actualizados según la tercera fase de la evaluación, existen diferentes posibilidades para la continuación: se podría continuar con la evaluación, basada en un incremento adicional de la precisión de los modelos adquiriendo más datos sobre la estructura y las acciones; alternatively se podría llevar a cabo una verificación probabilista con los modelos actualizados de las acciones y de la resistencia y utilizando un modelo estructural sofisticado; sin embargo, si una reducción adicional de las

incertidumbres relacionadas con las acciones y la resistencia no llevara a ningún beneficio tangible, se debería decidir el refuerzo o la sustitución de la estructura existente.

En el caso de que la fiabilidad de la estructura quede verificada en alguna de las fases de la evaluación, se puede proceder a la ampliación del tablero del puente existente. Para su futura explotación se deben planificar unas medidas de mantenimiento adaptadas a las características del puente estudiado. También se deben establecer las inspecciones necesarias y los plazos de realización de las mismas con el fin de asegurar que la estructura se encuentre en un estado aceptable para cumplir su función durante el período de uso futuro.

#### **4. ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN E HIPÓTESIS**

##### **4.1 Inspecciones y ensayos**

La calidad de la evaluación de una estructura existente no puede ser mejor que la calidad de la información en la que se basa. Por este motivo, la recopilación y la actualización de la información constituyen probablemente los pasos más importantes en la evaluación de una estructura existente. En muchos casos, debido a la falta de información, resulta necesario completar los datos disponibles (mediante inspecciones y ensayos) antes de proceder al análisis semiprobabilista de la primera fase de la evaluación (figura 2). La definición del programa de inspecciones, ensayos y mediciones incluye la selección de los parámetros que se quieran actualizar, la definición de los métodos de observación, la selección de probetas y testigos, las condiciones y disposiciones para los ensayos, el número de ensayos y los métodos de evaluación.

En el presente caso, la información disponible resulta relativamente extensa. Tanto la mencionada colección oficial de puentes arco de Ribera, como algunos estudios recientes sobre un número limitado de estos puentes que todavía están en servicio [Millanes 2000], contienen datos de gran utilidad. La recopilación de información sobre el puente de Elche de la Sierra ha permitido, además, localizar algunos documentos correspondientes al proyecto original (Planos, Memoria).

Con el fin de confirmar la información recopilada se ha efectuado un control estadístico de la geometría de los elementos principales, así como de las características de los hormigones empleados en estos elementos. También se ha efectuado una inspección visual

con el fin de detectar posibles daños y desperfectos (fisuras, filtraciones, huellas de corrosión, etc.). Finalmente, se ha estimado necesario efectuar un estudio geotécnico, tanto para confirmar las condiciones de la cimentación de los arcos como para determinar las características geotécnicas de los rellenos entre los muros en las zonas de acceso a la estructura propiamente dicha.

## **4.2 Solución estructural**

Debido a la ampliación deseada del tablero se debe adoptar una posible solución estructural antes de proceder a la evaluación (figura 2). La solución propuesta se basa en la construcción de un tablero nuevo mediante hormigón *in situ*. En esta solución, el tablero existente tiene una doble función. Por un lado se utiliza durante la construcción como encofrado de la parte central. Por otro lado, a través de una adecuada conexión, debe trabajar solidariamente con el hormigón nuevo, integrándolo en el mecanismo resistente del puente ampliado. El espesor mínimo de la capa de hormigón nuevo se determina de forma que los esfuerzos cortantes entre el voladizo nuevo y la parte recrecida del tablero existente se puedan transmitir sin la necesidad de prever una conexión mecánica a estos efectos.

Para las zonas de acceso se propone la construcción de dos nervios longitudinales de hormigón, paralelos a los muros de acompañamiento y apoyados en el relleno entre estos muros. Sobre estos nervios se apoyan unas losas prefabricadas con un espesor variable de 0.15 a 0.3 m que forman el tablero nuevo de 9 m de ancho.

## **5. MÉTODO DE ANÁLISIS**

### **5.1 Generalidades**

La realización de la solución propuesta en el apartado 4.2 requiere la comprobación previa de la seguridad de los arcos existentes frente a los posibles fenómenos de inestabilidad. A estos efectos se utiliza el procedimiento de evaluación reflejado en la figura 2. La descripción detallada de las distintas fases de la evaluación está fuera del alcance del presente resumen. Las técnicas empleadas y las decisiones a adoptar son análogas a las que se han presentado en relación con la evaluación y la rehabilitación de otros puentes, por

ejemplo en [Tanner 1997] y [Tanner 2000]. En el presente apartado se describe únicamente el método empleado para la verificación de la estabilidad de la estructura ampliada.

La forma de pandeo del sistema depende de un gran número de parámetros, entre ellos de la esbeltez de los arcos, de las condiciones de apoyo, de la contribución del tablero a la estabilidad global del sistema, así como de la disposición de las cargas de tráfico. Para la verificación de la seguridad del sistema frente a los posibles fenómenos de inestabilidad se emplea un procedimiento basado en el cálculo de la inestabilidad. Este procedimiento constituye una aproximación de un análisis no lineal, en principio suficientemente precisa. La necesidad de efectuar un análisis no lineal sólo se podría plantear en el caso de que se debiera proceder a una tercera fase de la evaluación de acuerdo con el apartado 3.

## 5.2 Cálculo de la inestabilidad

Los esfuerzos axiales no están afectados por los efectos de segundo orden. La diferencia,  $\Delta_M$ , entre los valores de cálculo de los momentos flectores determinados respectivamente según la teoría lineal (primer orden),  $M_{Sd,1^\circ}$ , y según la teoría de segundo orden,  $M_{Sd,2^\circ}$ , se puede expresar a través de la relación:

$$\Delta_M = \left[ \frac{M_{Sd,2^\circ} - M_{Sd,1^\circ}}{M_{Sd,1^\circ}} \right] \quad (1)$$

La diferencia  $\Delta_M$  se puede estimar mediante la siguiente aproximación:

$$\Delta_{M, est} = \left[ \frac{1}{1 - \frac{N_{Sd}}{N_{crit}}} - 1 \right] \quad (2)$$

$N_{Sd}$  valor de cálculo del esfuerzo axial para la disposición considerada de las cargas

$N_{crit}$  esfuerzo axial crítico para la misma disposición de las cargas, determinado según la teoría elástica

A efectos prácticos se adopta el siguiente procedimiento, para cada una de las disposiciones de las cargas que podría ser determinante:



- Las acciones se introducen en el modelo con sus valores de cálculo (valores a considerar en las verificaciones de los Estados Límite Últimos; multiplicador  $k = 1.0$ ).
- Se incrementa el valor de todas las acciones, incluidas las permanentes, multiplicándolas por el mismo factor  $k > 1.0$ .
- El valor del multiplicador  $k$  para el que se produce un efecto de inestabilidad (figura 3), asumiendo un comportamiento elástico lineal de los materiales, se denomina multiplicador crítico,  $k_{crit}$ .
- La diferencia estimada,  $\Delta_{M,est}$ , entre los valores de cálculo de los momentos flectores determinados respectivamente según la teoría lineal (primer orden),  $M_{Sd,1^\circ}$ , y según la teoría de segundo orden,  $M_{Sd,2^\circ}$ , corresponde a:

$$\Delta_{M,est} = \left[ \frac{1}{1 - \frac{1}{k_{crit}}} - 1 \right] \quad (3)$$

- Conociendo la diferencia  $\Delta_{M,est}$ , así como el valor de cálculo de los momentos flectores según la teoría lineal,  $M_{Sd,1^\circ}$ , se puede estimar el valor de cálculo de los momentos flectores según la teoría de segundo orden,  $M_{Sd,2^\circ}$ :

$$M_{Sd,2^\circ} = (1 + \Delta_{M,est}) \cdot M_{Sd,1^\circ} \quad (4)$$

- La verificación de la seguridad estructural se efectúa para las secciones transversales, teniendo en cuenta la interacción entre esfuerzo axial y momento flector (de segundo orden) :

$$S_d \{M_{Sd,2^\circ}; N_{Sd}\} \leq R_d \{M_{Rd}; N_{Rd}\} \quad (5)$$

$S_d$  valor de cálculo de la sollicitación (esfuerzo axial, momento flector)

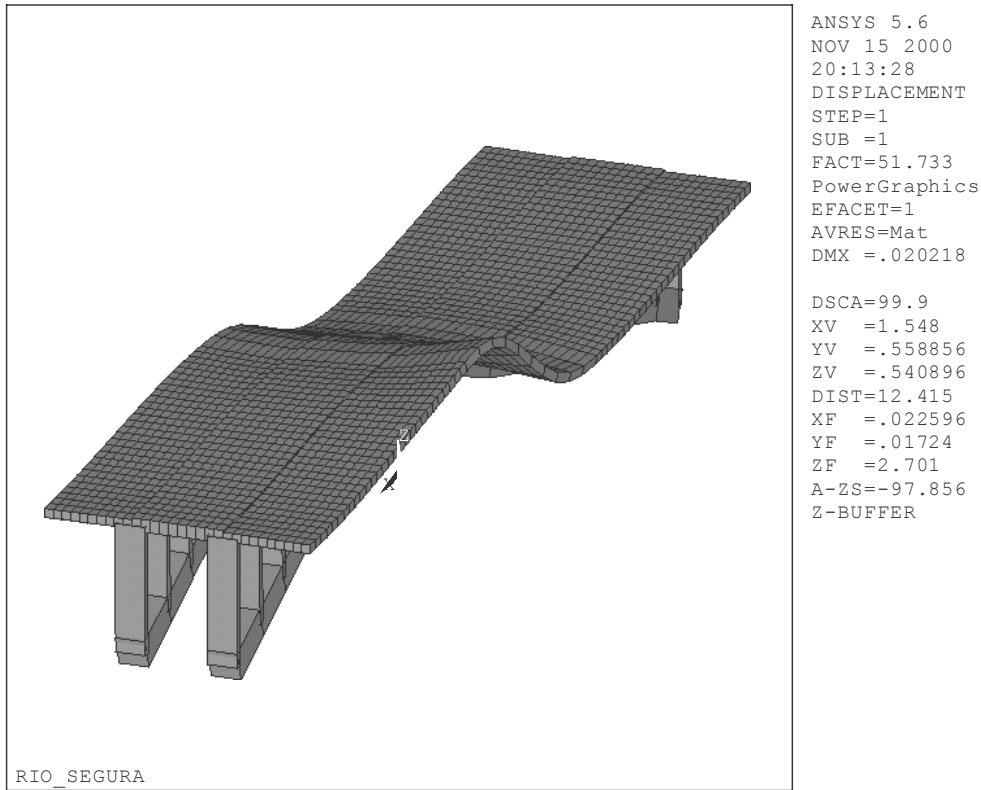
$R_d$  valor de cálculo de la resistencia correspondiente

$M_{Sd,2^\circ}$  valor de cálculo del momento flector según la teoría de segundo orden

$N_{Sd}$  valor de cálculo del esfuerzo axial

$M_{Rd}$  valor de cálculo de la resistencia a flexión de la sección

$N_{Rd}$  valor de cálculo de la resistencia a esfuerzos axiales de la sección



**Figura 3** Pandeo asimétrico del sistema

## 6. INTERVENCIÓN

El proceso constructivo adoptado para la realización de la solución estructural descrita en el apartado 4.2 resulta sencillo. Después de la demolición de la capa de rodadura y de las impostas del puente existente, se procede a la ejecución de unas rozas en la superficie del hormigón existente hasta descubrir las armaduras transversales existentes. Estas rozas se ejecutan en unas franjas de 1.5 m de ancho a ambos lados del tablero mediante hidrodemolición (figura 4).



**Figura 4** *Ejecución de rozas mediante hidrodemolición*

Para la ampliación del tablero se utiliza un hormigón de baja retracción que se une con el hormigón existente mediante un puente de unión. A efectos del encofrado de los voladizos del tablero se emplea un carro.

El conjunto de medidas mencionado (hidrodemolición, puente de unión, hormigón de baja retracción) contribuye a asegurar el trabajo solidario de los hormigones existente y nuevo. También permite atenuar la fisuración del hormigón nuevo vertido sobre el tablero existente.



**Figura 5** *Puente sobre el río Segura en Elche de la Sierra después de la intervención*  
(Fotografía: Paco Gómez)

La sencillez de la solución estructural adoptada y del proceso constructivo permitió terminar los trabajos de ampliación en la fecha prevista. La justificación de la fiabilidad de la estructura para las nuevas condiciones de utilización sin necesidad de reforzarla resultó fundamental para el cumplimiento de los plazos. El puente ampliado (figura 5) se abrió al tráfico en verano del año 2001.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Consejería de Obras Públicas de la Junta de Castilla – La Mancha (D. Antoliano Hernández García), propietaria del puente de Elche de la Sierra, así como a la empresa Vías y Construcciones (D. Manuel Martín Abella), adjudicataria de los trabajos de mejora de la carretera de Elche a Férez, que han posibilitado y apoyado el estudio presentado.

## **REFERENCIAS**

- [EHE 1998] EHE: Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de Fomento, Madrid, 1998. ISBN 84-498-0390-X.
- [IAP 1998] IAP: Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Ministerio de Fomento, Madrid, 1998. ISBN 84-498-0348-9.
- [Millanes 2000] MILLANES, F.: Inspección, evaluación estructural y rehabilitación de varios puentes arco de la colección de D. J. Eugenio Ribera. En: Técnicas Avanzadas de Evaluación Estructural, Rehabilitación y Refuerzo de Estructuras (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, IECA Levante, Ed.), Valencia, 2000. ISBN 84-931137-0-0, pp. 327-341.
- [Tanner 1997] TANNER, P.: Interaction between planning, execution and evaluation of tests. In : Evaluation of existing steel and composite bridges, IABSE Report nº 76, Zürich, 1997. ISBN 3-85748-091-2.
- [Tanner 2000] TANNER, P. y ORTEGA, L.: Rehabilitación de puentes del pasado. Una tarea del futuro. Hormigón y Acero, Madrid, nº 216, 2000, ISBN 0439-5689, pp. 127-137.